

И.И. Ведяков Д.В. Конин П.Д. Одесский

СТАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ



И.И. Ведяков, Д.В. Конин, П.Д. Одесский

СТАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ



Издательство АСВ
Москва
2014

Рецензенты:

д.т.н., проф., главный научный сотрудник Лаборатории металлических конструкций института ОАО «НИЦ «Строительство» – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко *Еремеев П.Г.*; к.т.н., президент «Ассоциации «Сталькон»» *Кулик Д.В.*

Ведяков И.И., Конин Д.В., Одесский П.Д.

СТАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ: Научное издание. – М.: Издательство АСВ, 2014. – 272 с.

ISBN 978-5-93093-955-2

Представлен отечественный и зарубежный опыт строительства уникальных высотных и многоэтажных зданий с применением стальных каркасов. Подробно рассмотрены вопросы выбора материалов стальных конструкций с учетом современных нормативных и эксплуатационных требований, возможностей мирового и отечественного металлургического производства. Описаны рациональные современные конструктивные системы, даны принципы компоновки каркасов, балочных клеток, связей, поперечных сечений элементов. Отдельно рассмотрены вопросы конструирования аутригερных конструкций зданий, а также учет неточностей монтажа при расчетах. Дана статистическая оценка неточностям монтажа высотных зданий. Описан комплексный подход к обеспечению безопасности высотных зданий, рассмотрены применяющиеся системы мониторинга, даны рекомендации по проведению научно-технического сопровождения высотных зданий на всех этапах его жизни в том числе после длительной остановки строительства.

Книга предназначена инженерам-проектировщикам, студентам старших курсов строительных вузов, аспирантам, инженерам технического надзора, участвующих в строительстве уникальных объектов.

ISBN 978-5-93093-955-2

© Издательство АСВ, 2014

© Ведяков И.И., Конин Д.В.,
Одесский П.Д., 2014

Научное издание

Иван Иванович **Ведяков**, Денис Владимирович **Конин**,
Павел Дмитриевич **Одесский**

СТАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

Компьютерная верстка *Е.М. Лютова*

Дизайн обложки *Т. Негрозова*

Редактор *В.Ш. Мерзлякова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98. Формат 60х90/16. Бумага офс. Гарнитура Таймс.

Печать офсетная. Усл. 17 п.л. Заказ №

ООО «Издательство АСВ»

129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации – оф. 511

тел., факс: (499)183-56-83, e-mail: iasv@mgsu.ru, <http://www.iasv.ru/>

ВВЕДЕНИЕ

Стальные конструкции наиболее полно удовлетворяют требованиям современного строительства: индустриализации, сокращению объемов и сроков работ на строительной площадке, снижению стоимости возведения. Преимущественно металлические конструкции используются при проектировании и строительстве большепролетных зданий и сооружений различного назначения, промышленных объектов с тяжелыми режимами работы кранов. Одним из наиболее динамично развивающихся направлений металлических конструкций в отечественной строительной практике и за рубежом являются многофункциональные высотные здания с металлическим каркасом или с использованием металлических колонн в качестве основных вертикальных несущих элементов.

В нашей стране накоплен и закреплен в строительных нормах огромный опыт расчета, проектирования и монтажа металлических конструкций промышленных предприятий, сооружений с большими пролетами, башенных и мачтовых антенных сооружений. Советская строительная отрасль во многом была ориентирована на железобетон, главным образом – сборный, и поэтому стальные каркасы именно для многоэтажных или высотных зданий нашли лишь ограниченное применение. Это знаменитые так называемые «сталинские» высотные дома, сооруженные в середине XX в., и их немногочисленные копии в странах Восточной Европы. Именно поэтому вопросы совершенствования методов расчета высотных зданий со стальными каркасами, наиболее достоверный учет воздействий, а также подходы к оценке качества смонтированных конструкций представляют несомненный интерес. Несмотря на это, на русском языке существует не так много литературы, посвященной именно вопросу конструирования высотных зданий. Кроме отечественного опыта проектирования и строительства зданий со стальными каркасами, в главе 1 приведен краткий обзор построенных и строящихся уникальных зданий за рубежом.

Современная технология упрочнения стального проката в потоке станов, используемая при его производстве, позволяет изготавливать фасонные двутавровые профили с толщиной полки до 125 мм и листовой прокат толщиной до 230 мм. Нормативный предел текучести сталей такого проката может достигать 350 МПа. Также возможно производство сталей высокой прочности толщиной до 120 мм с нормативным пределом текучести до 590 МПа. Все это от-

крывает для инженеров строительной отрасли новые перспективы в части увеличения пролетов основных несущих элементов, общей высоты зданий, концентрации материала на ограниченном пространстве этажа. О новых сталях, применяющихся при строительстве высотных зданий, рассказано в главе 3.

Дальнейшее развитие стальных конструкций для высотных зданий связано с разработкой методов расчета, более достоверно отражающих характер их действительной работы. Конструктивные особенности современных высотных зданий и увеличение нагрузок на отдельные его элементы, безусловно, приводят к повышению дополнительных нагрузок на несущие элементы, вызванные неточностями монтажа колонн. До настоящего времени не давалась системная оценка величинам отклонений и неточностей, возникающих в процессе реального монтажа, на основе исчерпывающих исполнительных измерений. Об учете отклонений, а также о других особенностях расчета и конструирования высотных зданий пойдет речь в главе 4. Требования к приемке смонтированных конструкций были сформулированы достаточно давно и в полной мере не могут быть использованы при строительстве зданий высотой более 150 м. В последние десятилетия разрабатываются территориальные нормы по расчету и проектированию высотных зданий, но данный круг вопросов ими не разрешен.

В главе 5 мы обобщим современный опыт строительства и мониторинга высотных зданий, а также представим комплексный подход к обеспечению их надежности и безопасной эксплуатации. Данный раздел включен в книгу ввиду значительного резонанса, который получают в последнее время вопросы научно-технического сопровождения строительства уникальных зданий и мониторинга готовых объектов.

Авторы благодарят вице-президента РААСН Владимира Ильича Травуша за многочисленные советы, рекомендации, ценные замечания по содержанию и рецензирование данной книги. Также авторы благодарны П.Г. Еремееву, Д.В. Кулику, М.П. Сону, С.М. Кониной, Л.С. Сошниковой за полезные советы и помощь в составлении рукописи.

Глава 1. РАЗВИТИЕ КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ ЗА РУБЕЖОМ

Внедрение металлических каркасов в конструкции многоэтажных зданий, а затем – высотных началось более 100 лет назад. К середине XIX в. в таких сооружениях, как мосты, большепролетные перекрытия, башни, металлические конструкции, они нашли достаточно широкое применение, но в многоэтажном строительстве долгое время не использовались вообще. Если исключить все те здания, в которых использовались железные и чугунные кованые элементы в качестве балок перекрытий или вспомогательных конструкций, то первым многоэтажным зданием со стальным каркасом была четырехэтажная шоколадная фабрика Менье близ Парижа, построенная в 1871–1872 гг. [9, 75]. Здание опиралось на мощные контрфорсы плотины, а каркас наружных стен был установлен на обвязку из швеллеров. Все горизонтальные нагрузки воспринимались ромбическими связями, установленными вдоль наружных стен. Как отмечают многие источники [9, 34, 35, 36, 40, 52, 60, 66, 79, 104, 105], настоящее высотное строительство в современном понимании зародилось после пожара в 1871 г. в крупнейшем промышленном центре того времени – городе Чикаго. В 1891 г. там были построены 13-этажное здание Тасота, а в 1893 г. – 20-этажное здание офисного назначения, в которых впервые коренным образом меняются функции наружных стен: из несущих конструкций они превращаются в заполнение каркаса. В связи с этим возникла необходимость в новых конструкциях, которые должны были обеспечивать жесткость и устойчивость многоэтажных зданий. Тогда же начинают появляться первые прототипы вертикальных стен-диафрагм и вертикальных связей различной конфигурации. До 40-х гг. XX в. в США ведется интенсивное строительство первых высотных зданий с металлическими каркасами, главным образом на острове Манхэттен в Нью-Йорке. Интенсивное развитие высотного строительства на примере Нью-Йорка иллюстрируют два фото, представленные на *рис. 1.1*. Среди них здание Flatiron Building, построенное в 1902 г., высотой 87 м (21 этаж – *рис. 1.2*); здание Met Life Tower, построенное в 1909 г., высотой 213 м (50 этажей); здание Woolworth Building, построенное в 1913 г., высотой 241 м (60 этажей – *рис. 1.3*); здание Chrysler Building (1930 г.) высотой 318 м (77 этажей); знаменитое здание Empire State Building (*рис. 1.4*), построенное в 1929 г., высотой 396 м (102 этажа), а вместе с телевизионной башней – 449 м и многие другие.

а)



б)



Рис. 1.1. Общий вид района Манхэттен в Нью-Йорке в 1921 и 1984 гг.

На последнем здании **Empire State** следует остановиться отдельно, так как это настоящая веха в высотном строительстве. Именно при его строительстве внедрялись передовые для того времени технологии строительства. Первоначально здание проектировалось с 85 офисными этажами и 17-этажной башней для причаливания дирижаблей [63] (см. *рис. 1.4*). Общая полезная площадь здания составляет $178\,000\text{ м}^2$, а его размер в плане в уровне 5-го этажа – $59,17 \times 129,41\text{ м}$. По мере увеличения высоты здания его размер в плане сокращается и на уровне 81-го этажа уже составляет $40,7 \times 56,6\text{ м}$ (*рис. 1.5, а, б*). Здание запроектировано симметричным в обоих направлениях. В центре располагаются лифтовые шахты, их холлы и лестничные клетки. Высота типового этажа составляет 3,5 м, а технических этажей на 5-м, 29-м, 54-м, 71-м уровнях – от 4,8

до 5,2 м. Каркас здания рассчитан на ветровую нагрузку интенсивностью 98 кг/м^2 , а причальная башня – на нагрузку 147 кг/м^2 и дополнительно на сосредоточенную горизонтальную силу 41 т от пришвартованного дирижабля. Полезная нагрузка на перекрытия принималась равной 220 кг/м^2 , а постоянная – 418 кг/м^2 . Шаг колонн по длине здания составляет 6,3 м, по ширине – 5,6 м, за исключением средней части, где для удобства расстановки лифтов шаг принят 8,35 м. Жесткость каркаса обеспечена системой вертикальных связей в виде подкосов по стенам шахт лифтов, в вне лифтовых шахт – системой жестких узлов в двух направлениях. В качестве основного элемента сечения колонн принят широкополочный двутавр, аналогичный современному W14×370 по [80], высотой 455 мм с толщиной

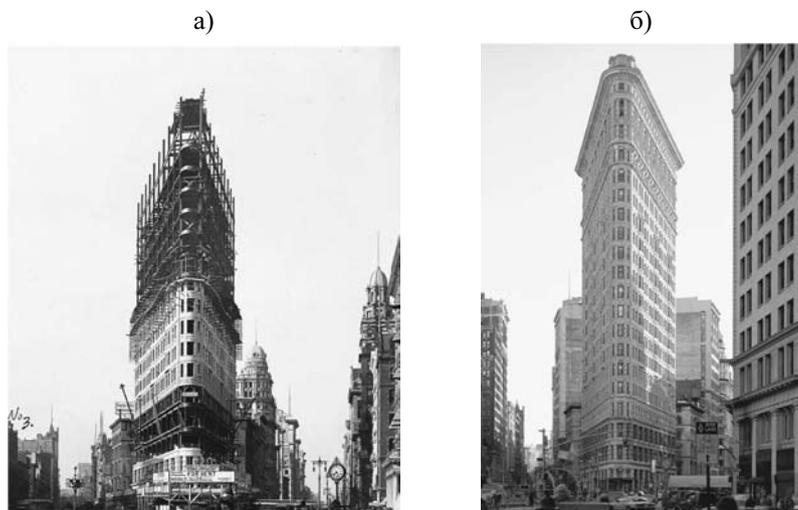


Рис. 1.2. Flatiron Building (фото из [98])

полки 68 мм и толщиной стенки 42 мм. В зависимости от приложенной к колонне нагрузки к двутавру приклепываются дополнительные листы к стенке и полкам (рис. 1.5, в). Наиболее нагруженная колонна рассчитана под нагрузку 4200 т. Перекрытие здания выполнено из шлакобетонных плит толщиной 10 см, армированных сеткой и опирающихся на прогоны, разложенные с шагом 2,5 м. Прогоны опираются на главные балки шарнирно на заклепках. Фундамент здания плитный по свайному основанию, при этом длина свай составляет не более 15 м. Следует заметить также, что здание было

возведено за 1 год и 40 дней, таким образом, за неделю возводилось не менее 4,5 этажа. Данный эффект был получен благодаря значительной типизации элементов перекрытий, удачной компоновке каркаса здания и расположения стыков колонн.

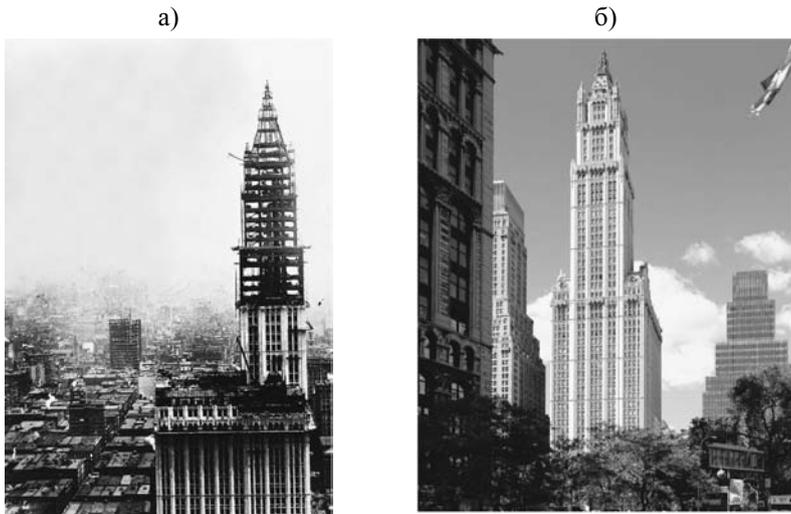


Рис. 1.3. Woolworth Building (фото из [98])

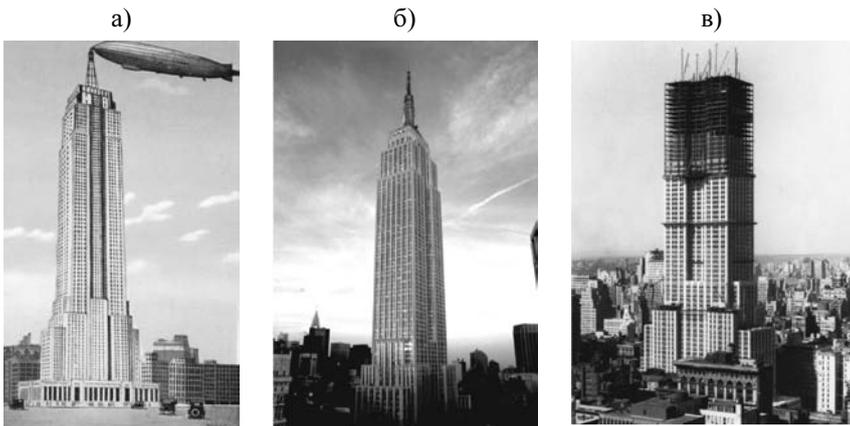
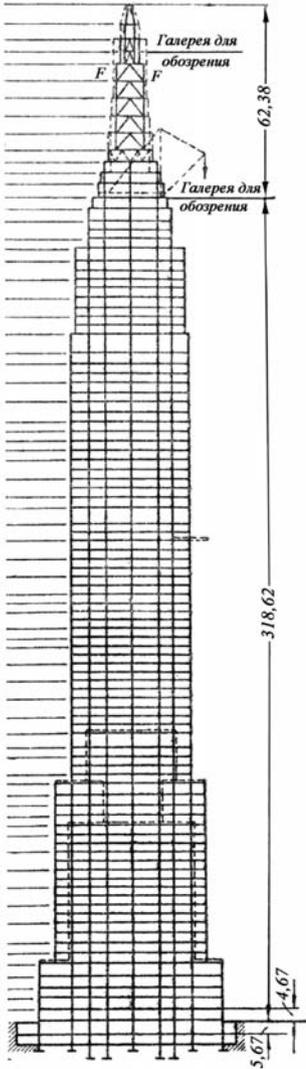


Рис. 1.4. Empire State Building (фото из [111])

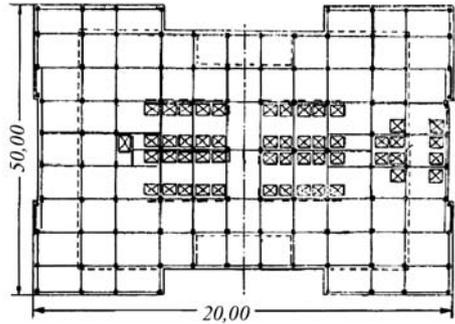
Если в самом начале строительства многоэтажных зданий использовались связевые каркасы, то при строительстве перечисленных сооружений использовалась рамно-связевая система, позволив-

шая достичь требуемой жесткости. В 40-х гг. XX в. с появлением сварных конструкций узлов широкое распространение получили рамные системы [9]. Примером применения рамной системы является здание Chase Manhattan Plaza, приведенное на *рис. 1.6*.

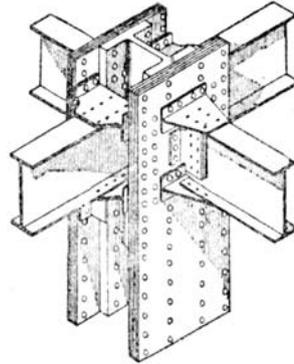
а)



б)



в)



г)



Рис. 1.5. Empire State Building:

а – план 10-го этажа; б – характерный разрез; в – узел сопряжения колонны и балок; г – монтаж одной из колонн верхнего этажа

Как показала практика зарубежного строительства, рамные и рамно-связевые системы неэффективны при увеличении высоты с возрастанием ветровых и прочих горизонтальных нагрузок [52, 79, 36, 104]. Поэтому к середине XX в. рост высотности зданий прекратился, совершенствовались методики расчета, монтажа, отработывалось применение новых материалов для конструкций и соединений.

С 1960-х гг. в высотное строительство активно внедряются новые конструктивные системы – ствольная и оболочковая. Их изобретение было запатентовано американским архитектором Ф. Каном в 1961 г. [40]. Ствольная система развивалась для зданий высотой до 300 м и получила широкое распространение благодаря экономичности и возможности удобной планировки. С использованием оболочковой системы возведены здания Sears (Willis) Tower высотой 442 м без антенны (США, Чикаго, 1974 г.), башни-близнецы World Trade Center высотой 417 м с антенной (США, Нью-Йорк, 1973 г., John Hancock Center высотой 343 м без антенны (США, Чикаго, 1969 г.), Bank of China Tower высотой 367 м (КНР, Гонгконг, 1990 г.) и некоторые другие. На *рис. 1.7* представлен процесс строительства башен WTC, а также видны отдельные элементы наружной оболочки несущей системы, которая представляет собой расставленные по периметру колонны с шагом 1,02 м, объединенные высокими балками. Колонна коробчатого сечения имеет габариты 450×450 мм [75], а ригель – высоту 1,32 м. Толщина стенок колонны колеблется в пределах от 12,5 до 7,5 мм, а предел текучести стали – от 7000 кг/см² до 2950 кг/см².

Одновременно с развитием металлических конструкций в практике высотного строительства внедряется и железобетон. До середины XX в. его применение ограничивается низкой по сравнению со сталью прочностью. Однако многие из высочайших на сегодняшний день зданий построены с применением высокопрочных бетонов с классом по прочности В60...В100. В первую очередь это башня Burj Khalifa в эмирате Дубай (ОАЭ), построенная в 2010 г., высотой 828 м (163 этажа) [81, 82]; здания-близнецы Petronas Towers в г. Куала-Лумпур (Малайзия), построенные в 1998 г., высотой 452 м (88 этажей); здание Taipei 101 в г. Тайпей (Тайвань) [100], построенное в 2004 г., высотой 508 м (101 этаж); здание Jin Mao в г. Шанхай (КНР) [103], построенное в 1998 г., высотой 420 м (88 этажей) и др.. Комбинацией ствольной и оболочковой систем является система «труба в трубе», в которой внутренний ствол объединен с наружной оболочкой при помощи аутригерных конструкций. Характерным для

таких зданий является наличие железобетонного или сталежелезобетонного внутреннего ствола и установленных по периметру колонн из стального фасонного проката. Примерами применения такой конструкции в современном высотном строительстве являются здания Trump International Hotel&Tower высотой 356 м (США, Чикаго, 2009 г.; *рис. 1.8, а*), Two International Finance Centre высотой 407 м (КНР, Гонконг, 2003 г.), башня на участке №10 ММДЦ «Москва-Сити» высотой 268 м (Москва, 2007 г.).

а)



б)



Рис. 1.7. World Trade Centre

В последние годы ввиду увеличения этажности возводимых зданий, особенно в странах Средней и Юго-Восточной Азии, наблюдается тенденция строительства так называемых «имиджевых» сверхвысотных зданий. Например, отмеченные выше Burj Khalifa и Taipei 101, а также здание Shanghai World Financial Center высотой 492 м (КНР, Шанхай, 2008 г.; *рис. 1.8, б*). В этих зданиях при конструировании удачно скомбинированы свойства современного стального проката и высокопрочного бетона [54, 81, 82, 97, 96, 100, 103, 106, 109]. В здании со ствольно-оболочковой несущей системой Burj Khalifa в наиболее нагруженных элементах использована жесткая арматура, а выше 120-го этажа использован металлический каркас,

завязанный на железобетонные пилоны или стальные вертикальные фермы [81, 82]. На некоторых сверхвысотных зданиях остановимся подробнее.

Здание **Shanghai World Financial Center**, располагается в деловом районе Шанхая Пудонг, в непосредственной близости от башни Jin Mao, и имеет высоту 492 м. Авторами конструктивного решения выступили специалисты фирмы Leslie E. Robertson Associates (LERA), США. В основании здание имеет форму квадрата со стороной 58 м. Соотношение высоты здания к его ширине составляет 8,5. Одной из особенностей башни является то, что ее возводили на существующем специально усиленном фундаменте, сооруженном для здания меньшей высоты (440 м). Именно поэтому для собственного веса конструкций проектируемого здания были установлены довольно строгие рамки. Учитывая его сложную геометрическую форму, повышенную нагрузку от тайфунов и землетрясений, а также ограничения по весу, в основных несущих элементах широко использована сталь. Несущий остов представляет собой «мегаструктуру», состоящую из центрального ядра, четырех мегаколонн (две из которых выше второго аутригера разветвляются на пару колонн каждая), диагоналей, соединяющих мегаколонны между аутригерами, а также 7 аутригерных этажей (рис. 1.8, в). Аутригерные этажи запроектированы таким образом, что обеспечивают совместную работу мегаколонн и центрального ядра для восприятия горизонтальных нагрузок и воздействий. Все аутригеры, кроме верхнего, имеют высоту, незначительно превышающую высоту типового этажа, а верхний аутригер – двухэтажный. Каждый аутригер состоит из опоясывающей фермы по периметру между мегаколоннами (рис. 1.9, а), а также вертикальных связей, соединяющих ядро жесткости и мегаколонны. Опоясывающие фермы кроме объединения мегаколонн воспринимают нагрузку от промежуточных колонн, на которые опираются балки типовых перекрытий. Диагонали «мега системы» выполнены из сварного коробчатого стального профиля (рис. 1.9, б) и заполнены бетоном для снижения вибраций при динамических воздействиях. Наиболее сложным узлом в конструкции всего здания является примыкание диагоналей к мегаколоннам, так как в этих местах на колонны передаются значительные поперечные нагрузки (рис. 1.9, б, в). Собственно мегаколонны представляют собой комбинированную сталежелезобетонную конструкцию, армированную отдельными стержнями диаметром до 50 мм, а также жесткой арматурой в виде сварных коробчатых профилей (рис. 1.9, г). Габарит-

ный размер колонн – в плане 5,5 м на нижних уровнях. В колоннах и основных диагоналях использована листовая сталь с пределом текучести до 590 МПа толщиной до 100 мм.

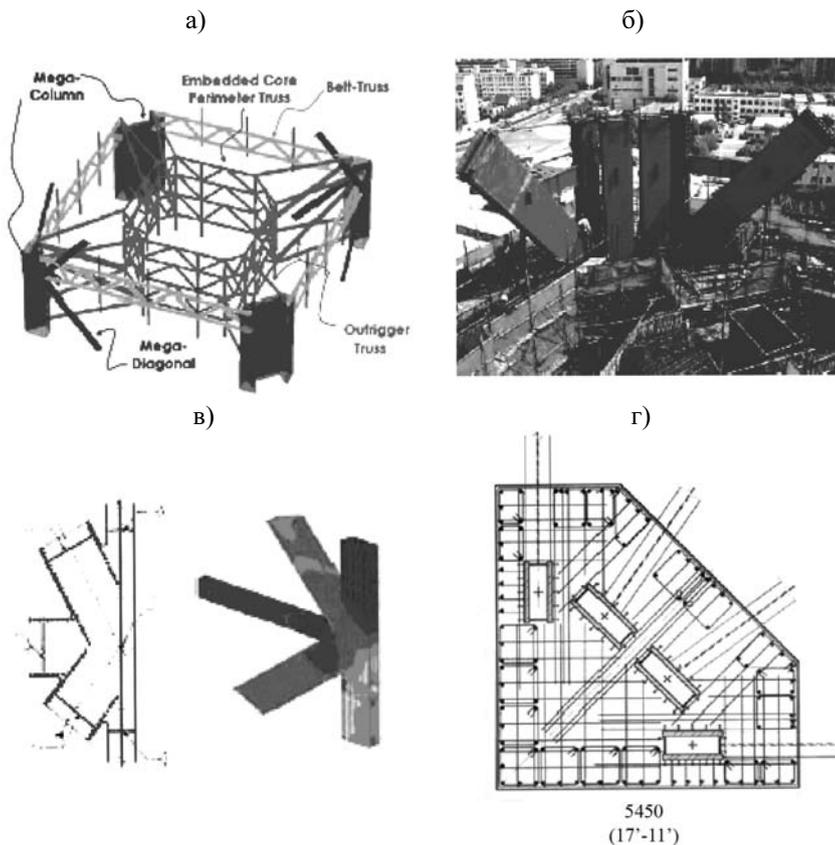


Рис. 1.9: Элементы SWFC: а – аутригерная конструкция, объединяющая мегаколонны и центральное ядро; б – диагонали мегасистемы, примыкающие к мегаколоннам (сталь толщиной до 150 мм); в – моделирование конечными элементами узла примыкания диагоналей к мегаколоннам; г – комбинированное сечение мегаколонны

В целях повышения устойчивости и прочности здания при выключении одного или нескольких несущих элементов были проведены соответствующие расчеты. Конструкции запроектированы таким образом, что при исключении четырех несущих колонн или некоторых элементов аутригерной фермы здание не разрушится. Перед расчетами проводилось детальное исследование здания в аэродинамической трубе, включающее: определение статических и

динамических нагрузок на конструкцию в климатических условиях Шанхая, определение комфортности пешеходных зон в основании здания, определение нагрузок и испытание фасадных систем.

Особо тщательно были выполнены расчеты здания на сейсмические воздействия совместно китайскими и специалистами из США. Кроме стандартных расчетных процедур, обычно применяемых к такого рода сооружениям, выполнены нелинейные расчеты конструкций для постоянно увеличивающейся динамической горизонтальной нагрузки. Установлено, что первые разрушения элементов мегасистемы начинаются при нагрузке, на 30% превышающей расчетную нагрузку от землетрясения (*рис. 1.10*). Первыми разрушаются стены от изгибающих моментов в центральном ядре жесткости в основании здания. Затем образуются пластические шарниры в диагоналях в уровне 42-го, 18-го этажей и т.д.. Расчет был прекращен при уровне нагрузки, превышающей расчетную нагрузку от землетрясения примерно в 2,5 раза. При этом зафиксированы разрушения от изгиба в двух мегаколоннах в уровне 30-го этажа, а также разрушения от сдвига в стенах ствола жесткости в уровнях 8-го и 16-го этажей.

Строительство здания SWFC успешно завершено в 2009 г. Общие виды строящегося здания на разных этапах представлены на *рис. 1.11*.

Основной высотной доминантой г. Шанхай (КНР) должно стать запроектированное и строящееся в настоящее время здание **Shanghai Tower** высотой 632 м (121 этаж) (*рис. 1.12*). Здание уникально не только высотой, но и решением фасадной системы, а именно: оно имеет два слоя фасадной конструкции. Внутренняя башня имеет коническую поверхность, а каждый этаж в плане представляет собой круг. Наружная фасадная оболочка создает необычный архитектурный облик и имеет неправильную форму. Между оболочками запроектировано вентилируемое пространство (атриум), прерывающееся по высоте здания техническими этажами. Такое уникальное решение позволяет создать сверхвысокое здание необычной и нерегулярной формы без ущерба для несущей системы здания, которая имеет правильную форму, оптимальную для восприятия ветровых и сейсмических динамических воздействий. Площадка строительства имеет ряд неблагоприятных факторов для возведения столь высоких зданий: значительные ветровые нагрузки, высокие риски ураганных ветров и тайфунов, высокая сейсмическая активность, мягкопластичные и текучие глины в основании,

характерные для поймы реки. Эти факторы заставили авторов проекта сделать несущую систему здания максимально простой, регулярной и симметричной (*рис. 1.12 б, в*). Конструктивные решения были разработаны совместно компаниями Cosentini Associates и Thornton Tomasetti Inc. (США, Нью-Йорк).

Основной вертикальный несущий элемент – центральный бетонный ствол (ядро) квадратной формы в плане со стороной около 30 м (*рис. 1.13*). На горизонтальные нагрузки ядро при помощи аутригеров работает совместно с периметральными, слегка наклоненными к центральной оси здания мегаколоннами, которые образуют внутреннюю фасадную оболочку. Мегаколонны расставлены на плане четырьмя парами по двум ортогональным осям и по одной в каждой четверти плана, на равном расстоянии от сдвоенных колонн (всего 12 колонн с шагом по периметру в уровне фундамента 25 м). По высоте здание разделено на 9 зон по 12–15 этажей каждая. В промежутках между зонами – двухъярусный технический этаж, который доходит до внешней фасадной оболочки, является его опорой и одновременно служит полом межфасадного атриума. Мегаколонны объединены по периметру кольцевыми сдвоенными опоясывающими фермами в уровне каждого технического этажа общим количеством 8 штук. Аутригеры объединяют ядро жесткости с мегаколоннами и располагаются в зоне 2-й, 4-й, 5-й, 6-й, 7-й и 8-й опоясывающих ферм. Центральное ядро запроектировано бетонным, опоясывающие фермы и аутригеры – стальными, мегаколонны – комбинированными (железобетонными с вертикальной жесткой арматурой из стальных профилей). Стальные профили жесткого армирования внутри железобетонных сечений мегаколонн являются «ключевыми элементами», так как служат опорой для опоясывающих ферм и аутригеров и фактически обеспечивают работу системы в целом. При расчетах использован программный комплекс Abaqus. Моделировались не только стальные элементы жесткой арматуры мегаколонн, но и бетонные сечения, их вмещающие. Бетонные сечения введены в расчетную схему оболочечными элементами, жесткая арматура – стержневыми. Строительные нормы КНР для нелинейных расчетов за пределами упругости материалов предлагают диаграммы работы материала, приведенные на *рис. 1.14, а*. Они и были использованы при расчете конструкций. Также были смоделированы стержневыми элементами стальная жесткая арматура ядра жесткости, на которые завязаны элементы крепления аутригера. Объемными элементами смоделированы узлы соединения аутригеров с жест-

кой арматурой ядра и узлы сочленения опоясывающей фермы с мегаколоннами. Для этих элементов в Abaqus можно получить диаграммы работы по трем параметрам (момент, осевая сила, кручение) для всех стадий работы конструкций. По ним судили об общей работе конструкции под динамическими нагрузками при нелинейном расчете.

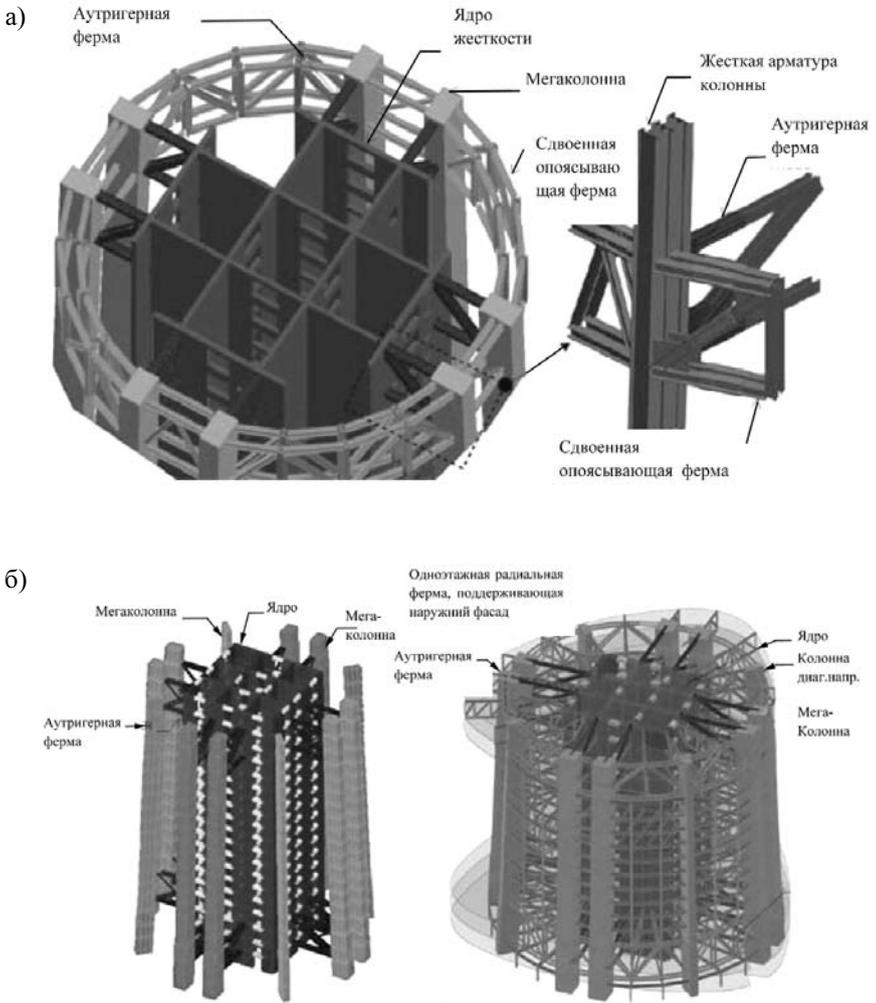


Рис. 1.13. Элементы здания Shanghai Tower: а – детальная схема несущей системы в зоне аутригера, соединение аутригера с мегаколоннами; б – несущая система внизу здания

Фундамент здания представляет собой сплошную железобетонную плиту толщиной 6 м, опирающуюся на 947 буровых свай диаметром 1 м и длиной 52 и 54 м. Для имеющихся грунтовых условий была определена сейсмичность площадки и создана программа расчетов (*табл. 1.1*), включающая критерии оценки несущей способности здания в соответствии с нормами КНР. После последовательных расчетов и подбора сечений, конструкторы добились следующих параметров от любой возможной сейсмической нагрузки: максимальное перемещение верха здания составит не более 1/130 высоты; железобетонные стены ядра работают в зоне упругих деформаций, кроме незначительных локальных участков; большая часть перемычек в стенах ядра жесткости претерпевает пластические деформации, в некоторых образуются пластические шарниры; сталь элементов аутригерных конструкций, а также жесткая арматура мегаколонн работает в пределах упругости. Таким образом, в соответствии с нормами КНР здание можно охарактеризовать как «безопасное для жизни людей» при землетрясениях. Особое внимание при проектировании конструкций было уделено сопряжению опоясывающих ферм с мегаколоннами и аутригерными конструкциями. Так как опоясывающие фермы имеют кольцевое очертание в плане, они примыкают к колоннам под углом. Для предотвращения закручивания жесткой арматуры мегаколонн в них установлены дополнительные продольные пластины. Аналогичный узел использован в месте крепления аутригера к ядру жесткости. Следует отметить, что стальные профили для крепления ферм к ядру не идут снизу до верха ядра, а установлены лишь в зоне аутригера и обеспечивают надежную анкеровку стальных конструкций в бетонных стенах. Вертикальная жесткая арматура также соединялась горизонтальными профилями по верхнему и нижнему поясам аутригера с элементами, расположенными на противоположной стороне ядра.

Как было сказано выше, здание имеет уникальную двойную систему фасадов. Внешняя оболочка фасада сформирована из легких трубчатых профилей, в плане имеет очертание неправильного треугольника со скругленными углами (*рис. 1.14, б*), стороны которого дуговые, сужаются сверху, а также закручиваются вокруг оси здания. Каркас внешней оболочки образован горизонтальными кольцевыми трубками по периметру, опирающимися на фахверки, наклонные вдоль спирально закручивающегося фасада. В горизонтальном направлении в плоскости каждого перекрытия кольцевые трубки поддерживаются распорками, которые, в свою очередь, раскреплены на каждом этаже горизонтальными крестовыми связями (*рис. 1.15*).

159. Раузин, Л.С. Конструктивная прочность стали / Л.С. Раузин, Е.А. Шур. – М.: Машиностроение, 1975. – 58 с.
160. Одесский, П.Д. Ударная вязкость стали металлических конструкций / П.Д. Одесский, И.И. Ведяков. – М.: Интермет Инжиниринг, 2003. – 232 с.
161. Одесский, П.Д. Стали с высоким сопротивлением экстремальным воздействиям / П.Д. Одесский, Д.В. Кулик. – М.: Интермет Инжиниринг, 2008. – 239 с.
162. Одесский, П.Д. Оценка сопротивления проката для металлических конструкций распространению трещин / П.Д. Одесский, Д.В. Соловьев, К. Форхайм // Деформация и разрушение металлов. 2005. № 9. С. 11–19.
163. Одесский, П.Д. О нормативной оценке нижней критической температуры вязко-хрупкого перехода толстолистовых сталей для конструкций ответственного назначения / П.Д. Одесский, Д.В. Кулик, К. Форхайм // Деформация и разрушение металлов. 2006. № 12. С. 26–32.
164. World Trade Center Building Performance Study Data Collision, Preliminary Observations, and Recommendations Feclci.il Emergency Management Agency. Report FEMA 403/ May 2002.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Развитие конструкций высотных зданий за рубежом.....	5
Глава 2. Отечественный опыт проектирования и строительства высотных зданий и сооружений.....	36
Глава 3. Материалы для каркасов высотных зданий.....	68
3.1. Сечения колонн и сортамент.....	68
3.2. Общая характеристика сталей для металлических конструкций.....	69
3.3. Развитие сталей для зданий повышенной и высокой этажности.....	70
3.4. Современные требования к сталям больших толщин.....	75
3.5. Особенности методики испытаний.....	80
3.6. Свойства проката больших толщин из современных сталей.....	89
3.7. Общие выводы по главе 3.....	112
Глава 4. Расчет и конструирование высотных зданий.....	113
4.1. Выбор конструктивной системы.....	113
4.2. Основные несущие элементы.....	120
4.3. Нагрузки и воздействия на высотные здания.....	143
4.4. Работа высотных зданий с применением этажей жесткости (аутригеров).....	158
4.5. Неточности монтажа и их учет при расчетах.....	172
4.6. Общие расчетные положения.....	220
4.7. Основные узлы.....	227
Глава 5. Комплексный подход к обеспечению безопасности высотных зданий.....	245
5.1. Специальные технические условия.....	245
5.2. Изготовление и монтаж металлоконструкций.....	246
5.3. Мониторинг за техническим состоянием.....	249
5.4. Возобновление строительства высотных зданий после остановки возведения на длительный период.....	255
Список литературы.....	264